

实验名称: 交流电路认识及参数测试
 院 (系): 电气工程学院 专 业: 电气工程及其自动化
 姓 名: 王皓冬 学 号: 16022627
 实 验 室: 103 室 实验组别: _____
 同组人员: 无 实验时间: 2023 年 12 月 18 日
 评定成绩: _____ 审阅教师: _____

一、实验目的

- (1) 研究一阶电路的方波响应；
- (2) 掌握一阶电路时间常数的测量方法；进一步掌握示波器的使用。
- (3) 学习运用电路实现微分、积分的方法，并采用实验的方法验证理论；
- (4) 学习理论设计、实验测量、对比总结的研究方法。

二、实验原理（预习报告内容，如无，则简述相关的理论知识点。）

1、复习一阶电路的时域响应

(1) 零状态响应：

对于图 1 所示 RC 一阶电路，开关 S 在位置 2， $u_c(0_-) = 0$ ，处于零状态，当 $t=0$ 时，开关转到位置 1，直流电源通过 R 向 C 充电。

由方程 $u_c(t) + RC \frac{du_c(t)}{dt} = U_s \quad t \geq 0$ 和初始条件 $u_c(0_-) = 0$

电容的电压和电流随时间变化的规律为：

$$u_c(t) = U_s(1 - e^{-t/\tau}) \quad t \geq 0$$

$$i_c(t) = \frac{U_s}{R} e^{-t/\tau} \quad t \geq 0$$

式中 $\tau = RC$ 称为时间常数； τ 越大，过渡过程持续的时间越长。

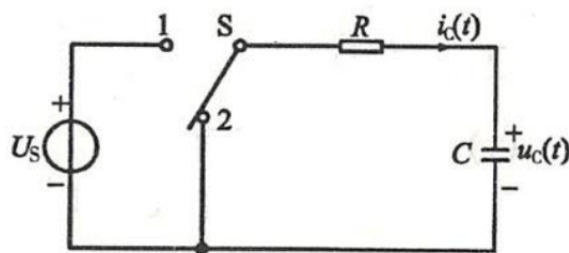


图 1 零状态响应和零输入响应

(2) 零输入响应：电路在无激励情况下，由储能元件的初始状态引起的响应。

图 1 中，当开关 S 置于位置 1，充电稳定后， $u_c(0_-) = U_o$ 时，再将开关 S 转到位置 2，

电容的初始电压 $u_c(0_-)$ 经 R 放电。

由方程 $u_c(t) + RC \frac{du_c(t)}{dt} = 0 \quad t \geq 0$ 和初始条件 $u_c(0_-) = U_o$

电容上的电压和电流随时间变化的规律为：

$$u_c(t) = U_c(0_-) e^{-t/\tau} \quad t \geq 0$$

$$i_c(t) = \frac{U_c(0_-)}{R} e^{-t/\tau} \quad t \geq 0$$

(3) 全响应：电路在输入激励和初始状态共同作用下引起的响应称为

如图 2 所示电路，当 $t=0$ 时合上开关 S，则描述电路的微分方程为

$$u_c(t) + RC \frac{du_c(t)}{dt} = U_s$$

初始值为 $u_c(0_-) = U_0$

可以得出全响应

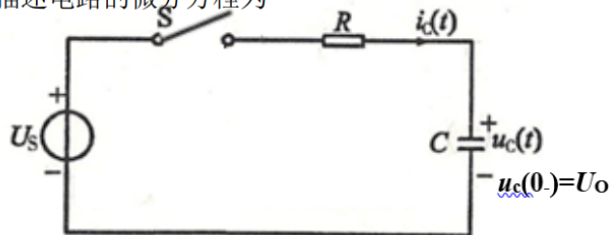


图 2 全响应

$$u_c(t) = U_s(1 - e^{-t/\tau}) + u_c(0_-)e^{-t/\tau} = [u_c(0_-) - U_s]e^{-t/\tau} + U_s \quad t \geq 0$$

零状态分量 零输入分量 自由分量 强制分量

$$i_c(t) = \frac{U_s}{R} e^{-t/\tau} - \frac{u_c(0_-)}{R} e^{-t/\tau} = \frac{U_s - u_c(0_-)}{R} e^{-t/\tau} \quad t \geq 0$$

零状态分量 零输入分量 自由分量

总结：

①全响应是零状态分量和零输入分量之和

②全响应也可以看成是自由分量和强制分量之和，自由分量的起始值与初始状态和输入有关，而随时间变化的规律仅仅决定于电路的 R、C 参数；强制分量则仅与激励有关。当 t 趋向于 ∞ 时，自由分量趋于零，过渡过程结束，电路进入稳态。对于上述零状态响应、零输入响应和全响应的一次过程， $u_c(t)$ 和 $i_c(t)$ 的波形可以用长余辉示波器直接显示出来。示波器工作在慢扫描状态，观察信号接在示波器的 DC 耦合输入端。

(4) 零状态电路对单位阶跃函数 $U(t)$ 的响应称为阶跃响应。

工程上常用阶跃函数和阶跃响应来描述动态电路的激励和响应。例如图 1 所示电路，在 $t=0$ 时开关 S 从位置 2 转到位置 1，等效为一个幅度为 U_s 的阶跃信号 ($U_s U(t)$) 的作用；当 $t=t_0$ 时，开关 S 由位置 1 转到位置 2，等效为阶跃信号 ($U_s U(t)$) 与延时阶跃信号 ($-U_s U(t-t_0)$) 的共同作用 ($t \geq t_0$)。对于线性定常电路，当电路的激励是一系列阶跃信号 $U(t)$ 和延时阶跃信号 $U(t-t_0)$ 的叠加时，电路的响应也是该电路的一系列阶跃响应和延时阶跃响应的叠加。

(5) 方波响应及时间常数 τ 测量。

方波信号可以看成是一系列阶跃信号和延时阶跃信号的叠加。设方波幅值为 U_s ，则方波可以写成

$$u_s(t) = U_s U(t) - U_s U(t - \frac{T}{2}) + U_s U(t - T) - U_s U(t - \frac{3}{2}T) + \dots$$

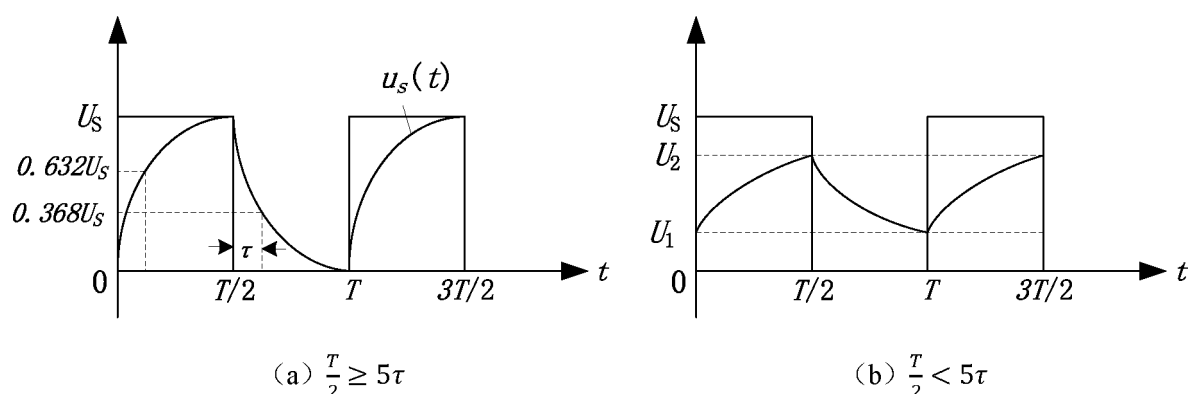
①当方波的半个周期远大于电路的时间常数 (≥ 5) 时，可使电容每次充、放电的暂态

过程基本结束，再开始新一次的充、放电暂态过程。这时，一个周期方波信号作用的响应

$$u_c(t) = U_s \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) U(t) - U_s \left(1 - e^{-\frac{t-\frac{T}{2}}{\tau}}\right) U\left(t - \frac{T}{2}\right) =$$

$$\begin{cases} U_S \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) & 0 \leq t \leq \frac{T}{2} \\ U_S e^{-(t-\frac{T}{2})/\tau} & \frac{T}{2} \leq t \leq T \end{cases}$$

从图 3 (a) 可以看出, 充电曲线对应电路的零状态响应, 放电曲线对应电路的零输入响应。方波响应是零状态响应和零输入响应的多次过程。因此, 可以用方波响应借助示波器 来观察和分析零状态响应和零输入响应, 并从中测出时间常数 τ 。对于充电曲线, 幅值由 零上升到终值的 63.2% 所需的时间为时间常数。对于放电曲线, 幅值下降到初值的 36.8% 所需的时间为时间常数



②当方波的半个周期等于甚至小于电路的时间常数时, 电容每次充、放电的暂态过程尚未结束, 又开始新一次的充放电暂态过程。这样, 充放电过程都不可能完成, 如果 3 (b) 所示, 充放电的初始值可以用以下公式求出:

$$U_1 = \frac{U_S(1 - e^{-\frac{T}{2\tau}})e^{-T/2\tau}}{1 - e^{-T/\tau}}$$

$$U_2 = \frac{U_S(1 - e^{-\frac{T}{2\tau}})}{1 - e^{-T/\tau}}$$

2、复习积分电路和微分电路;

(1) 积分电路:

如图 4 (a) 所示, 方波信号作用在 RC 电路中, 当时间常数 $\tau (=RC)$ 很大 ($\tau = 10 \cdot \frac{T}{2}$)

$$\text{时, } u_o(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt \approx \frac{1}{RC} \int_0^t u_s(t) dt$$

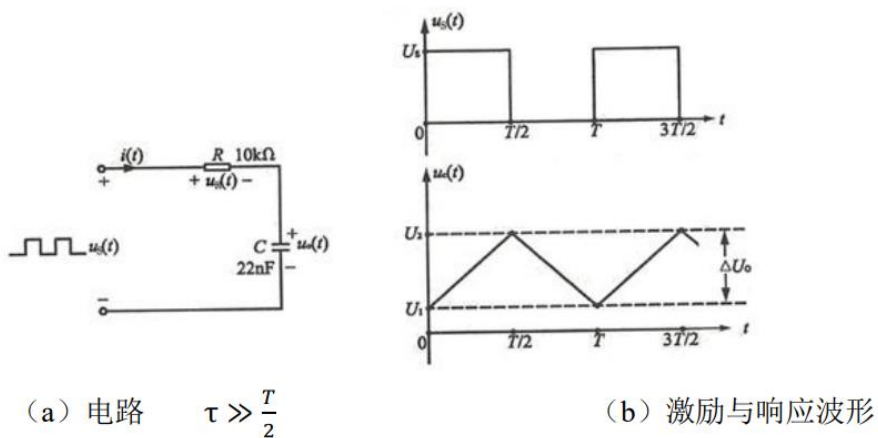


图 4 积分电路

(2) 微分电路:

如图 5 (a) 所示电路中, 当时间常数 τ 很小 ($\tau = \frac{1}{10} \cdot \frac{T}{2}$) 时,

$$u_o(t) = Ri(t) = R \cdot C \frac{du_c(t)}{dt} \approx RC \frac{du_s(t)}{dt}$$

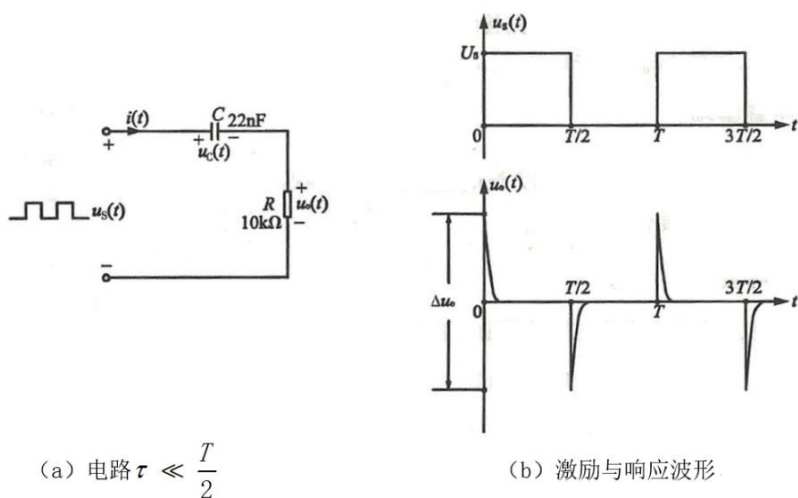


图 5 微分电路

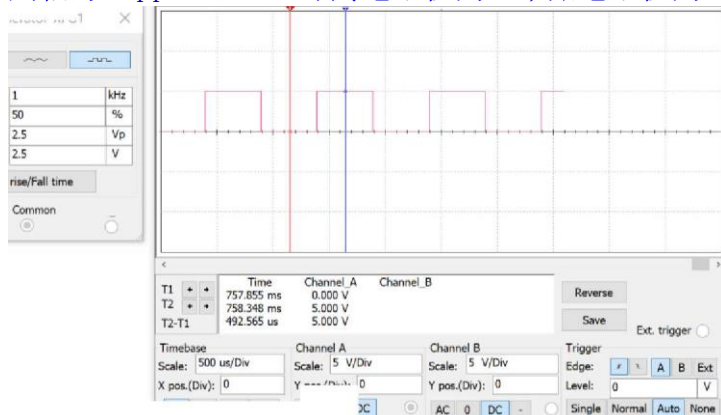
图 5 微分电路

3、掌握 Multisim 软件中积分电路、微分电路激励信号的获得方法，可以用两种：

(1) 信号源库 (Sources) 的电压源 (SIGNAL_VOLTAGE_SOURCES) 中的时钟信号源 (CLOCK_VOLTAGE)

(2) 右侧仪器列中，选择 Function generator (信号发生器)，双击仪器，可以弹出参数设置对话框，选择方波信号，注意 Amplitude (振幅) 设置，单位是 Vp，其输出有两种接法：

1) 如图 6 接法 1，右侧仪器为示波器 (Oscilloscope)，用+和 Common (中间接口)，Common 端接电路地 (与示波器共地)，设置 Amplitude 为 2.5Vp，Offset 为 2.5V，则信号 $V_{pp}=5V$ ，此时高电平值为 5V，低电平值为 0V；



2) 如图 7 接法 2，用+和-，-端接电路地 (与示波器共地)，如果不改设置，此时 $V_{pp}=10V$ ，为第一种接法的 2 倍。如果需要 $V_{pp}=5V$ ，高电平值为 5V，低电平值为 0V，则应设置 Amplitude 为 1.25Vp，Offset 为 1.25V。

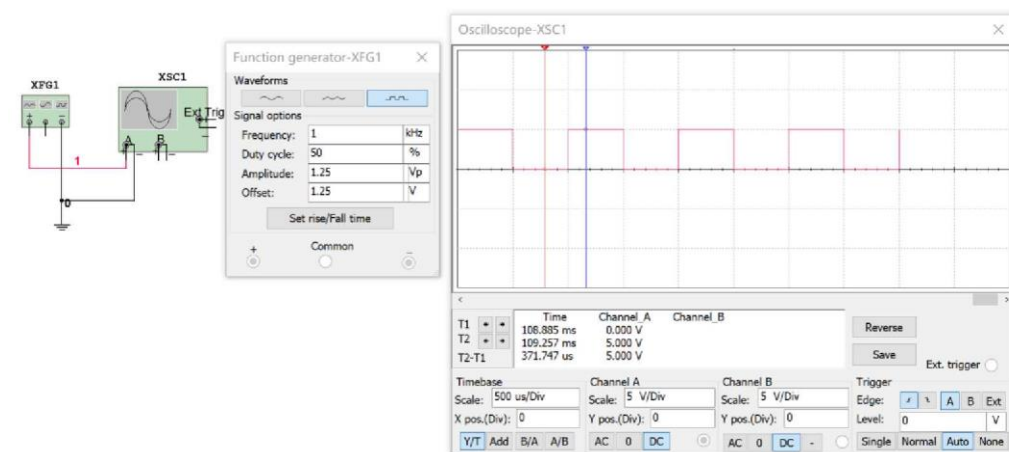


图 7 信号发生器接法 2

4、确定实验内容 1 电路电阻取值。

5、按照实验内容 2 参数要求，结合自身已有元件，设计积分、微分电路。并用 Multisim 软件进行仿真，预先测量记录相应波形 (激励与响应同时观察) 及数据值。

提醒：双击接至示波器通道 A (或 B) + 端的连线，设置 Net color，可以设置波形不同颜色，便于区别，示波器波形截图时，点 Reverse，将底色改为白色，便于看清波形。注意：仿真时微分电路不能用光标测 Δ ，因为光标定位不到积分波形的最高点和最低点，会导致读数误差很大，直接用波形所占格数乘以对应通道 Scale

三、实验内容

1、研究 RC 电路的方波响应

实验电路如图 8 所示：要求电路时间常数 $\tau=0.066\text{ms}$ 。确定电路 R 参数。

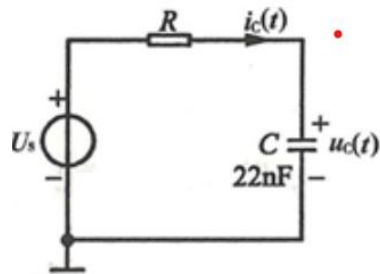


图 8 方波响应电路

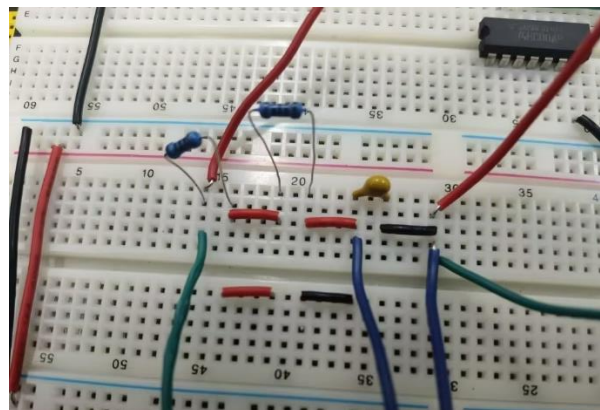
RC 串联，则时间常数

$$\tau = RC = 0.066\text{ms}$$

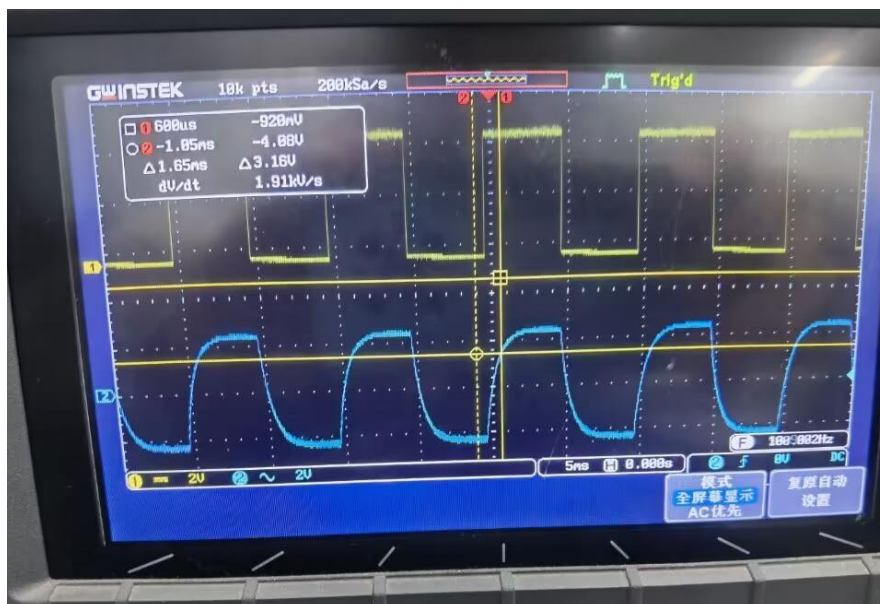
有

$$R = \frac{\tau}{C} = 3\text{k}\Omega。$$

(1) 激励信号取频率为 1kHz ，高电平电压为 5V ，低电平电压为 0V 的方波。用示波器观察测量并记录方波响应 $u_c(t)$ 和 $i_c(t)$ 波形，解释观察到的 $u_c(t)$ 波形现象。



测得 $u_c(t)$ 波形如下：



由 $U = RI$ ，用 $u_R(t)$ 代替 $ic(t)$ ，波形如下：



对波形进行理论分析。

进行定性分析。一个周期中，前半周期内，电容器电压响应为零状态响应；后半周期内，电容器电压响应为零输入响应。由于周期大于时间常数的 $3 \sim 5$ 倍，每次充放电的过程近似能够进行完全。

定量分析。全响应的理论计算式

$$U_C(t) = U_S \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) + U_C(0^+) e^{-\frac{t}{\tau}}$$

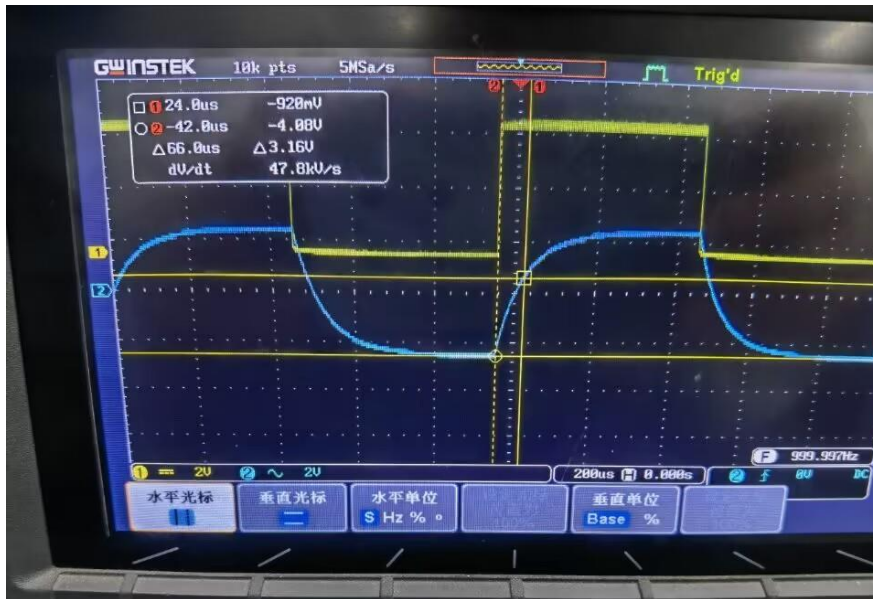
代入数据得：

$$U_C(t) = 5 \left(1 - e^{-\frac{t}{0.066m}} \right) \quad (\text{充电})$$

$$U_C(t) = 5 e^{-\frac{t}{0.066m}} \quad (\text{放电})$$

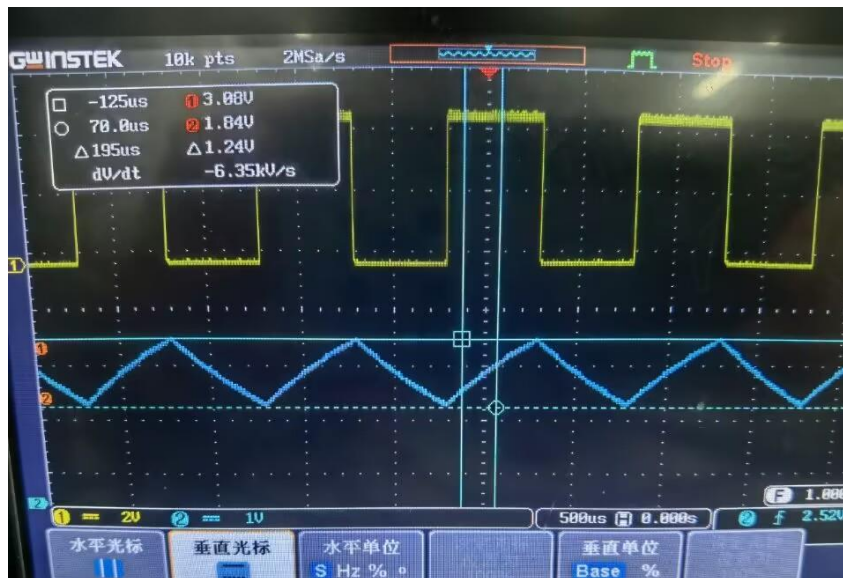
因此示波器中显示此图像。

(2) 测出电路实际时间常数 τ 。



利用 Cursor 找到电压为 0.632Us (3.16V) 的点，横坐标与零点之间的距离即为时间常数的值。测得 $\tau = 66.0\mu\text{s}$ ，与理论值相符。

(3) 将 R 值增至 10 倍值，输入激励信号不变，观察响应 $u_C(t)$ 波形现象做如何变化，并作记录分析。

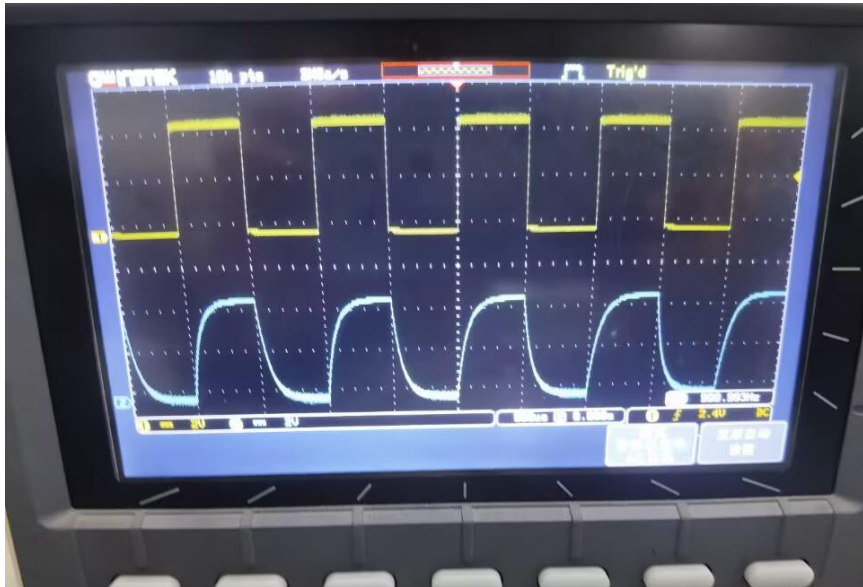


观察发现，波形变为近似折线的形状。这是由于时间常数

$$\tau = RC$$

R 增大为 10 倍时，时间常数相应增大十倍，导致相同时间内放电不完全，呈现近似直线的形状。

(4) 要能保持 (1) 中响应 $u_C(t)$ 波形现象，如何调整输入信号？观察记录调整后的 $u_C(t)$ 波形。



分析可知，只需将响应时间也增大 10 倍即可。响应时间增大十倍对应信号源频率减小为 0.1 倍，即 $f=100\text{Hz}$ 。

2、积分电路和微分电路

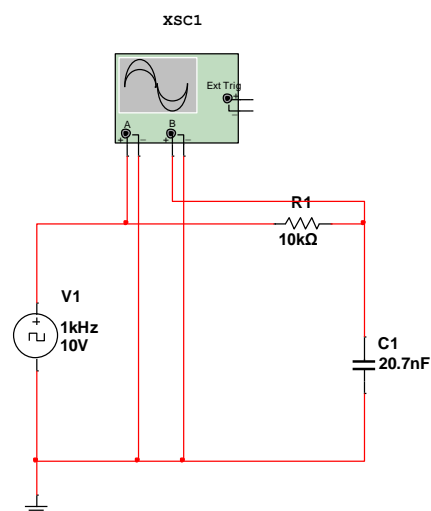
设计并搭试积分、微分电路， $\tau = 0.2\text{ms}$ ，选取合适的输入方波频率，用示波器观察记录各输出电压 u_o 波形，测量 Δu_o 、 U_S 并计算 $\Delta u_o / U_S$ 比值。与 Multisim 软件仿真结果对比分析。

注意测量方法：当交流信号叠加直流信号，交流信号很小，直流信号相对于交流信号较 大时，要精确测量交流信号，示波器通道耦合方式须用交流耦合。

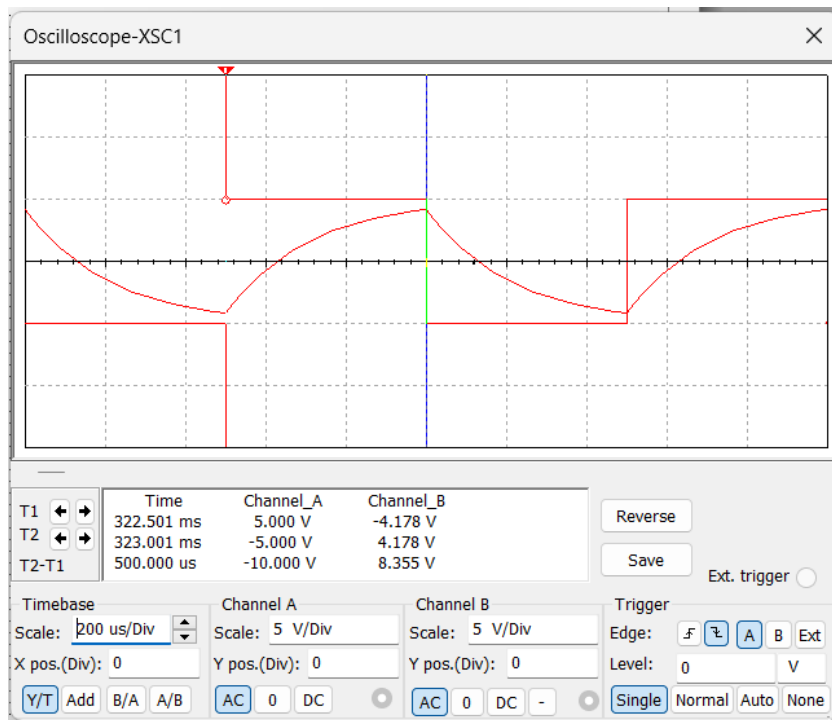
选取器件 $R = 10\text{k}\Omega$ ， $C_1 = 10.3\text{nF}$ ， $C_2 = 10.4\text{nF}$ ， $C = 20.7\text{nF}$ 则

$$\tau = RC = 0.207\text{ms} \approx 0.2\text{ms}$$

设计积分电路如下：（不合理的频率更改仿真见后文）

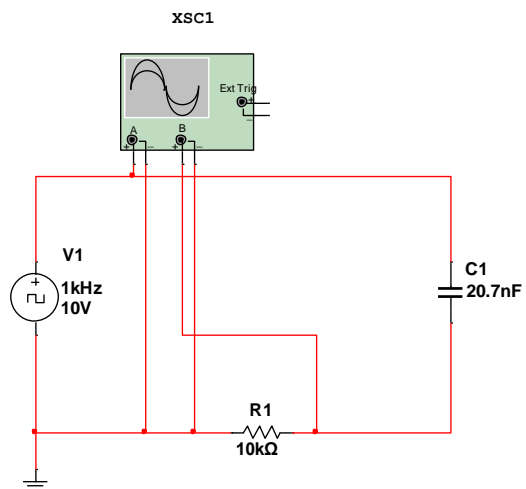


电容充放电波形：

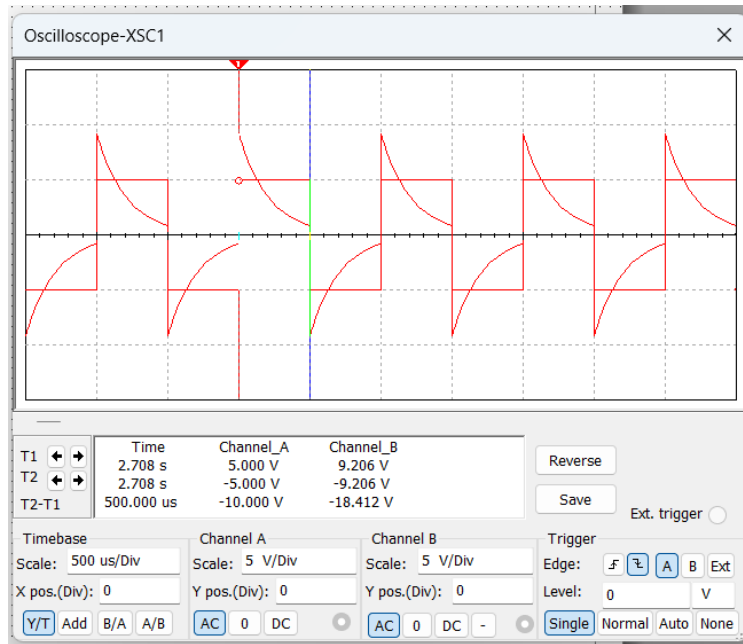


$\Delta u_0 = 8.355\text{V}$, $U_s = 10\text{V}$, $\Delta u_0/U_s = 0.84$

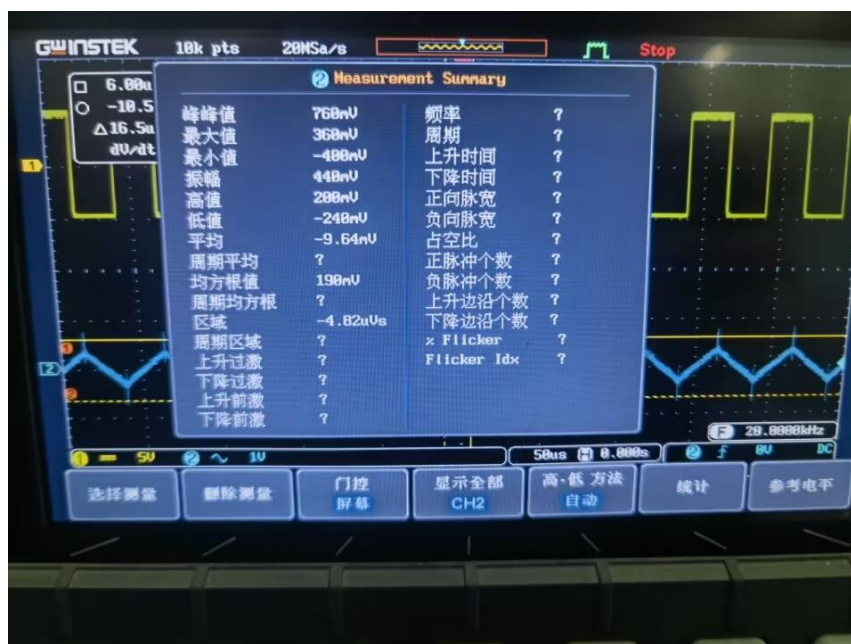
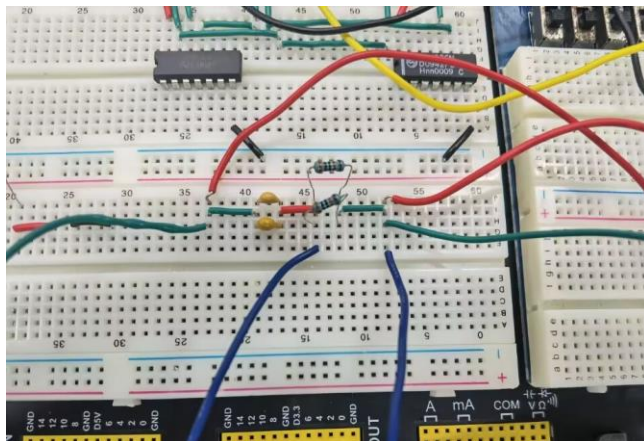
微分电路如下:



电阻电压波形代替电流波形:

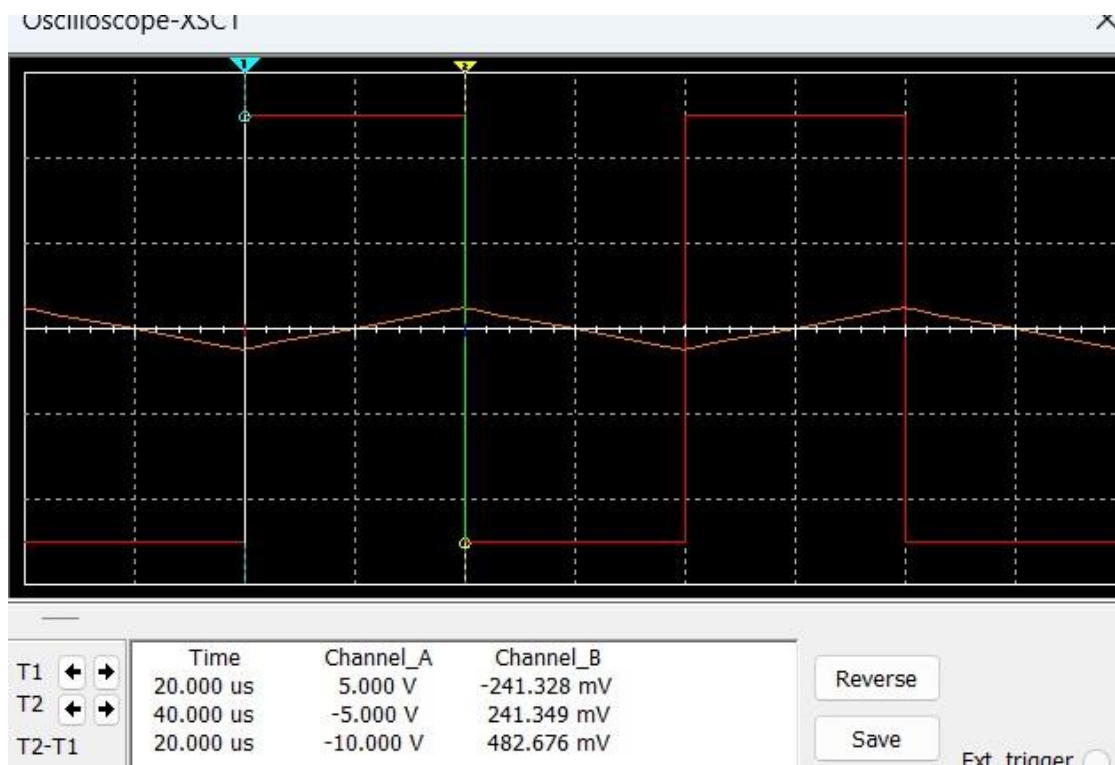
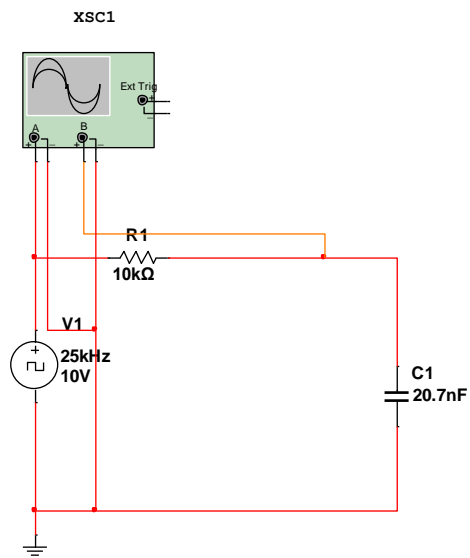


$\Delta u_0 = 18.41\text{V}$, $U_s = 10\text{V}$, $\Delta u_0/U_s = 18.41$
实际实验如下，搭接积分电路：



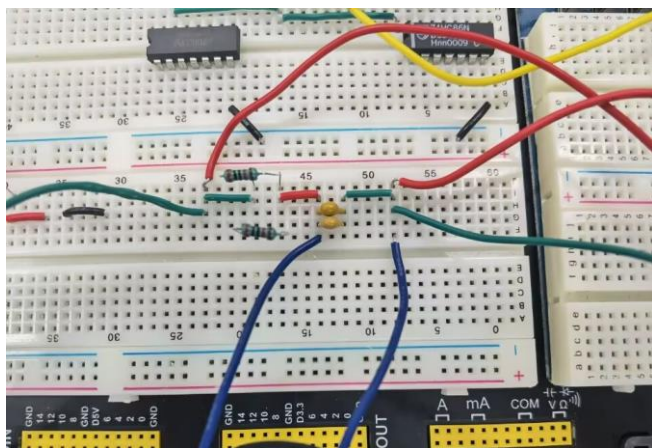
测得实际 $\frac{\Delta U_0}{U_S} = 0.076$ 。

由于预习中错误地选取了信号源频率，更改仿真如下：



仿真所得 $\frac{\Delta U_0}{U_S} = 0.048$ 。

搭接微分电路如下：



测得实际 $\frac{\Delta U_0}{U_S} = 1.88$ 。

数据记录如下。

电路	$\frac{\Delta U_0}{U_s}$	
	仿真值	实验值
积分电路	0.048	0.076
微分电路	1.84	1.88

观察可知，积分电路仿真结果与实际结果偏差较大，其可能原因是：

1. 电阻和电容的标称值和实际值略有差别，当激励信号的频率较大时，这种差别造成的影响被扩大了；
2. 波形 Measure 所得值跳动频繁，且在值较小时幅度较大；Cursor 测量有认为误差。

而对于微分电路，两者测出来的误差相对较小，更符合仿真结果。

四、实验总结

（实验出现的问题及解决方法、思考题（如有）、收获体会等）

这次实验我提前了一周完成，虽然忘记了测具体数值，但完整地完成了一遍实验流程，使得当堂验收时能很快地重复一遍实验手法，并完成实验。

这次实验中遇到的困难是对于积分电路信号源频率选取标准不清楚。信号源的频率应足够大，使得波形得到近似直线的一小段，从而能够测出 $\frac{\Delta U_0}{U_s}$ 。

总体而言，本次实验较为成功。

五、参考资料（预习、实验中参考阅读的资料）

电路教学计划 2023